

УДК 621.391.26

А. А. Дятко¹, А. С. Храменков², С. Н. Ярмолик², П. Н. Шумский³¹Белорусский государственный технологический университет²Военная академия Республики Беларусь³РНПЦ «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»**КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ
УТОЧНЕНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О КЛАССЕ ОБЪЕКТА
И О ПРОДОЛЖЕНИИ НАБЛЮДЕНИЯ**

Статья посвящена задаче повышения эффективности распознавания радиолокационных объектов. Для повышения достоверности классификации радиолокационных объектов предлагается использовать квазиоптимальный алгоритм распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения. Рассмотрены особенности построения устройства радиолокационного распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения. Процедура принятия решения в таком устройстве разделяется на два этапа: принятие предварительного решения (о наблюдении объекта k -го класса) и окончательного решения (в пользу объекта k -го класса или о продолжении наблюдения). Возможность последовательного уточнения информации о классе объекта позволила в качестве априорных вероятностей для последующих шагов использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Качество функционирования последовательного устройства радиолокационного распознавания для текущего значения отношения сигнал-шум характеризовалось совокупностью M (количество классов) условных вероятностей правильного распознавания, M средних вероятностей ложного распознавания. Кроме того, важной характеристикой последовательной процедуры классификации является ее средняя длительность. Для предложенного квазиоптимального алгоритма распознавания с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения приведены результаты расчета характеристик распознавания радиолокационных объектов трех классов.

Ключевые слова: решение о классе объекта, средний риск, последовательная процедура проверки гипотез, уточнение информации, характеристики распознавания.

A. A. Dyatko¹, A. S. Khramenkov², S. N. Yarmolik², P. N. Shumskiy³¹Belarusian State Technological University²Military Academy of the Republic of Belarus³RSPC “Center of the Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”**QUASIOPTIMUM ALGORITHM OF RADAR-TRACKING RECOGNITION
WITH SEQUENTIAL SPECIFICATION OF THE INFORMATION
ON THE OBJECT CLASS AND ABOUT SUPERVISION CONTINUATION**

The article is devoted to the problem of increasing efficiency of radar-tracking recognition. To increase the radar-tracking classification reliability the quasioptimum algorithm of recognition with sequential specification of the information on the object class and about supervision continuation is offered to be used. The features of radar-tracking recognition device construction with sequential specification of the information on the object class and about supervision continuation are considered. Decision-making procedure in such a device is divided into two stages: the acceptance of the preliminary decision and the definitive decision. As aprioristic probabilities for the subsequent steps posterior probabilities of the previous step of classification are used. Quality functioning of the sequential radar-tracking recognition device was characterized by conditional probabilities of correct recognition, average probabilities of false recognition. The results of calculation of radar-tracking recognition characteristics of three classes are presented for offered quasioptimum algorithm of recognition with sequential specification of the information on the object class and about continuation of supervision.

Key words: the decision about object class, average risk, sequential procedure of hypotheses check, specification of the information, the recognition characteristic.

Введение. Современные радиолокационные системы, особенно военного назначения, должны характеризоваться высокой информативностью.

С этой целью радиолокационные комплексы оснащаются системами распознавания объектов. Радиолокационное распознавание заключается

в установлении факта принадлежности наблюдаемого объекта к определенному классу [1]. Информация о классе объекта может использоваться при решении широкого круга задач: целеуказания, целераспределения, селекции объектов на фоне ложных целей, определения очередности сопровождения и обстрела целей и т. п. [1].

Поскольку в практически важных случаях радиолокатор имеет возможность последовательного многократного обращения к наблюдаемому объекту, то использование последовательных процедур для решения задач распознавания позволяет повысить качество принимаемых решений [1]. Следует отметить, что в литературе, как правило, освещаются последовательные правила применительно к двум гипотезам [2, 3]. Последовательные методы решения многоальтернативных задач зачастую рассматриваются в обобщенном виде [3], а приведенные результаты носят эмпирический характер.

В [4] представлен последовательный байесовский алгоритм распознавания, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых решений на каждом шаге наблюдения. Приведенный алгоритм позволяет повысить эффективность распознавания радиолокационных объектов по сравнению с одноэтапными процедурами. Вместе с этим оптимальный алгоритм классификации требует использования ряда априорных данных, что может затруднять его практическое применение. В связи с этим определенный интерес представляет задача получения квазиоптимального алгоритма распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения.

Синтез квазиоптимального устройства распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения. Приведенный в [4] оптимальный алгоритм последовательной классификации предполагает, что решению о принадлежности наблюдаемого объекта к одному из M классов или о продолжении наблюдения ($M + 1$ гипотеза) на n -м шаге соответствует гипотеза, характеризующаяся минимальным значением одного из выражений:

$$J_n^k(\xi_n) = \sum_{i=1, i \neq k}^M P_n(A_i)(C_{ki}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad (1)$$

$$k = \overline{1, M},$$

$$J_n^{M+1}(\xi_n) = \sum_{i=1}^M P_n(A_i)(C_{M+1i}^n - C_{ii}^n)\Lambda(\xi_n|A_i), \quad (2)$$

где $J_n^k(\xi_n) = J_k^n$ – значение апостериорного риска, характеризующее принадлежность наблюдаемого объекта к k -му классу на n -м шаге процедуры распознавания; ξ_n – вектор принятого сигнала на n -м шаге, представляющий собой аддитивную смесь радиолокационного портрета (РЛП) цели и фона; $P_n(A_i) = P_i^n$ – априорная вероятность наличия объекта i -го класса на n -м шаге; C_{ki}^n – цена за принятое решение в пользу k -го класса при наличии объекта i -го класса на n -м шаге; $\Lambda(\xi_n|A_i) = \Lambda_i^n$ – отношение правдоподобия объекта i -го класса на n -м шаге процедуры распознавания; $J_n^{M+1}(\xi_n) = J_{M+1}^n$ – значение апостериорного риска, характеризующее продолжение наблюдения на n -м шаге процедуры распознавания; C_{M+1i}^n – цена за принятое решение о продолжении наблюдения при наличии объекта i -го класса на n -м шаге.

На основании выражений (1), (2) процедуру принятия решения можно разделить на два этапа: предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^* и окончательное решение в пользу объекта k -го класса A_k^* или продолжение наблюдения A_{M+1}^* . Если $J_k^n \leq J_l^n$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то принимается предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^* . После принятия предварительного решения A_k^* проверяется возможность остановки последовательной процедуры наблюдения. Если $J_k^n \leq J_{M+1}^n$, то принимается окончательное решение о принадлежности наблюдаемой цели к k -му классу A_k^* . Если указанное условие не выполняется (т. е. риск продолжения наблюдения меньше риска принимаемого решения), то принимается решение о продолжении наблюдения A_{M+1}^* и осуществляется переход к $n + 1$ шагу процедуры распознавания.

Переход к квазиоптимальному байесовскому последовательному алгоритму предполагает исключение зависимости стоимостей принятых решений от номера шага процедуры распознавания ($C_{ki}^n = C_{ki}$), а также по аналогии с критерием «идеального наблюдателя» выбор стоимостей правильных решений равными нулю $C_{ii}^n = 0$, $i = \overline{1, M}$, а цен за ошибочные решения

равными единице $C_{ki}^n = 1, i = \overline{1, M}$. Стоимость продолжения наблюдения может быть выбрана $C_{M+1i}^n = C_{obs}^n < 1, i = \overline{1, M}$.

Согласно введенным допущениям, предварительное решение о наблюдении объекта k -го класса A_k^{*} принимается в соответствии с правилом:

$$\text{если } \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \leq \sum_{i=1, i \neq l}^M P_i^n \Lambda_i^n, \quad (3)$$

$$l = \overline{1, M}, l \neq k, \text{ то } A_k^{*}.$$

Преобразовав выражение (3), получим правило принятия предварительного решения в виде

$$\text{если } P_k^n \Lambda_k^n \geq P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}, l \neq k, \text{ то } A_k^{*}. \quad (4)$$

Для проверки возможности остановки процедуры классификации проверяется условие $J_k^n \leq J_{M+1}^n$. После подстановки (1) и (2) в приведенное неравенство, решающее правило принимает следующий вид:

$$\text{если } \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \leq \sum_{i=1}^M P_i^n C_{obs}^n \Lambda_i^n, \text{ то } A_k^{*}. \quad (5)$$

Преобразовав выражение (5), получим условие прекращения наблюдения:

$$\text{если } P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n \leq (1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n, \text{ то } A_k^{*}. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражений для предварительного (4) и окончательного (6) решений правило принятия решения в пользу k -го класса для квазиоптимального последовательного алгоритма на n -м шаге примет вид

$$\text{если } \begin{cases} P_k^n \Lambda_k^n \geq P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}, l \neq k \\ P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n \leq (1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n \end{cases} \text{ то } A_k^{*}. \quad (7)$$

Возможность последовательного уточнения информации позволяет в качестве априорных вероятностей для последующих шагов использовать апостериорные вероятности предыдущего шага классификации. Исходя из максимальной априорной неопределенности, на первом шаге процедуры априорные вероятности появления распознаваемых объектов принято считать одинаковыми $P_{n=1}^l = 1/M, l = \overline{1, M}$ [1]. Выражение для априорной вероятности l -го класса на $n+1$ шаге определяется в соответствии с формулой Байеса:

$$P_l^{n+1} \equiv P_n(A_l | \xi_n) = \frac{P_l^n \Lambda_l^n}{\sum_{i=1}^M P_i^n \Lambda_i^n}, \quad (8)$$

где $P(A_l | \xi_n)$ – апостериорная вероятность принадлежности цели к l -му классу на n -м шаге.

Обобщенная структурная схема, реализующая последовательное решающее правило, минимизирующее средний риск принимаемых решений, представлена на рис. 1.

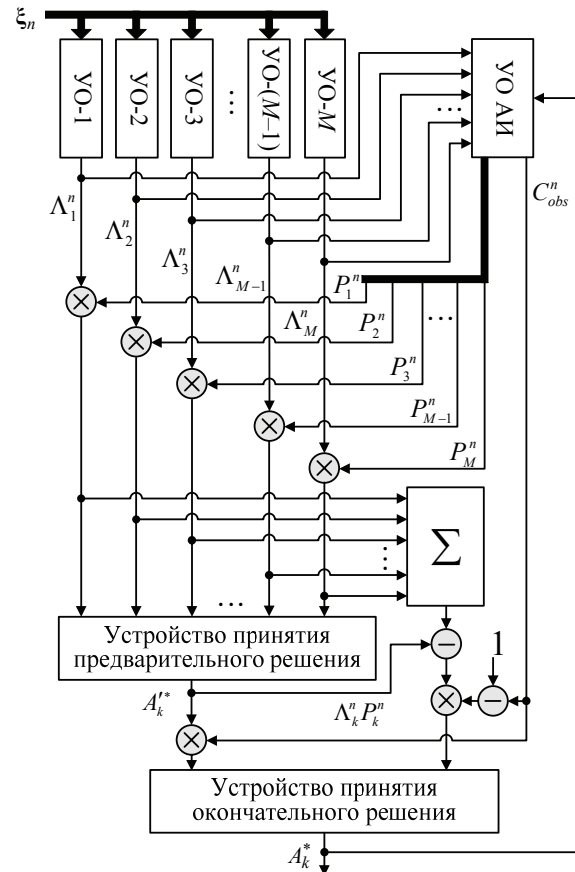


Рис. 1. Структурная схема квазиоптимального устройства последовательного распознавания

На n -м шаге процедуры классификации на входы каждого из M устройств обработки (УО) радиолокационного портрета поступает реализация РЛП ξ_n . На выходах УО РЛП формируются значения отношения правдоподобия (ОП) $\Lambda_l^n, l = \overline{1, M}$ для каждого из M распознаваемых классов. В устройстве оценивания апостериорной информации (УО АИ) на основе сформированных ОП в соответствии с (8) рассчитываются значения апостериорных вероятностей $P(A_l | \xi_n)$ для каждого класса, которые на следующем

шаге процедуры распознавания будут использоваться в качестве априорных. Кроме того, УО АИ хранит информацию о стоимости продолжения наблюдения C_{obs}^n . Согласно (4), производится коррекция сформированных ОП с учетом имеющейся априорной информации. В устройстве принятия предварительного решения по максимальному значению $P_l^n \Lambda_l^n, l = \overline{1, M}$ принимается предварительное решение о наблюдаемом объекте A_k^{n*} и выдается значение $P_k^n \Lambda_k^n$, соответствующее данному классу. На основе сформированных значений $P_k^n C_{obs}^n \Lambda_k^n$ и $(1 - C_{obs}^n) \sum_{i=1, i \neq k}^M P_i^n \Lambda_i^n$, в соответствии с (6), принимается решение о наличии объекта k -го класса или о переходе к $n + 1$ шагу наблюдения.

Результаты расчета показателей качества распознавания объектов. Качество функционирования устройств радиолокационного распознавания для текущего значения отношения сигнал-шум (ОСШ) γ принято [1] характеризовать совокупностью M условных вероятностей правильного распознавания D_k и M средних вероятностей ложного распознавания: $F_k = 1 / (M - 1) \sum_{l=1, l \neq k}^M F_{k/l}$, где $F_{k/l}$ – условные вероятности ложного распознавания $l, k = \overline{1, M}, l \neq k$. Последовательные устройства распознавания дополнительно характеризуют средней длительностью процедуры принятия решения \bar{N}_k .

Оценивание качества функционирования разработанного квазиоптимального алгоритма распознавания радиолокационных объектов с последовательным уточнением информации о классе объекта и о продолжении наблюдения проводилось методом математического моделирования. С этой целью имитировались флуктуационные РЛП [1] целей трех классов, исходными данными для моделирования были: число элементов РЛП – $N = 10$; время корреляции флуктуаций сигнала для объектов анализируемых классов – $\tau_1 = 12$ мс, $\tau_2 = 40$ мс, $\tau_3 = 80$ мс. Цена за продолжение наблюдения не изменялась в зависимости от номера шага $C_{obs}^n = C_{obs} = 0,1$. Максимальное число этапов

процедуры $N_{\max} = 10$, по достижению N_{\max} принималось предварительное решение. Полученные вероятности правильного распознавания приведены на рис. 2.

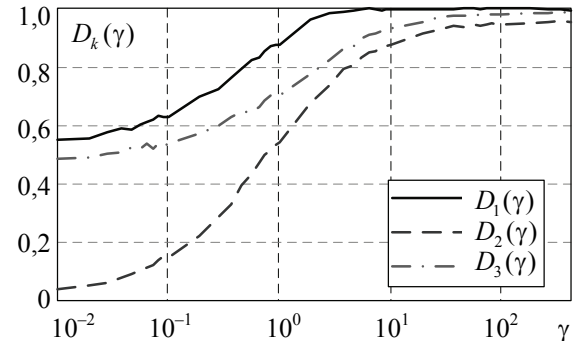


Рис. 2. Вероятности правильного распознавания в зависимости от ОСШ

Полученные вероятности ложного распознавания представлены на рис. 3.

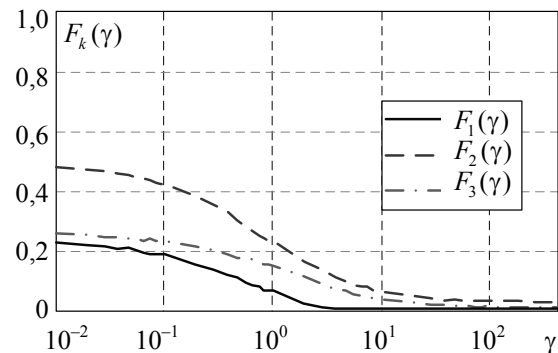


Рис. 3. Вероятности ложного распознавания в зависимости от ОСШ

Значения средней длительности процедуры распознавания приведены на рис. 4.

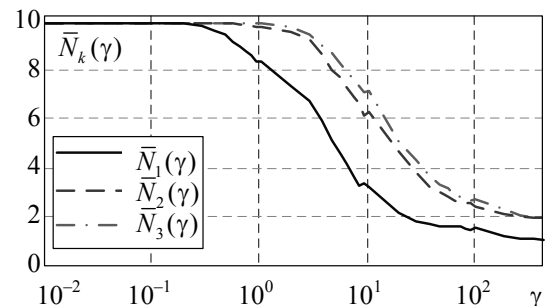


Рис. 4. Значения средней длительности последовательной процедуры распознавания

Заключение. Полученный квазиоптимальный алгоритм последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых

решений о классе объекта и о продолжении наблюдения, характеризуется достаточной простотой и высокими показателями качества классификации.

Это достигается благодаря использованию подхода, основанного на последовательном уточнении априорной информации.

Литература

1. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и РЭБ. М.: Воениздат, 1983. 456 с.
2. Вальд А. Последовательный анализ. М.: Физматгиз, 1960. 328 с.
3. Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин. М.: Наука, 1971. 256 с.
4. Храменков А. С., Ярмолик С. Н. Алгоритм последовательного распознавания радиолокационных объектов, обеспечивающий минимизацию среднего риска принимаемых решений // Доклады БГУИР. 2016. Т. 1, № 3. С. 28–32.

References

1. Okhrimenko A. E. *Osnovy radiolokatsii i REB* [Bases of a radar-location and RES]. Moscow, Voenizdat Publ., 1983. 456 p.
2. Wal'd A. *Posledovatel'nyy analiz* [Sequential analysis]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 328 p.
3. Fu K. *Posledovatel'nyye metody v raspoznavanii obrazov i obuchenii mashin* [Sequential methods in pattern recognition and machine learning]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 256 p.
4. Khramenkov A. S., Yarmolik S. N. Radar-tracking objects sequential recognition algorithm, providing minimization average risk of accepted decisions. *Doklady BGUIR* [Papers of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2016, vol. 1, no. 3, pp. 28–32 (In Russian).

Информация об авторах

Дятко Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информатики и веб-дизайна. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Dyatko_A@tut.by

Храменков Андрей Сергеевич – адъюнкт кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Республика Беларусь). E-mail: Xras.tech@mail.ru

Ярмолик Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств. Военная академия Республики Беларусь (220057, г. Минск, пр-т Независимости, 220, Республика Беларусь). E-mail: Yarmsergei@yandex.ru

Шумский Петр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе. РНПЦ «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси» (220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15/5, Республика Беларусь). E-mail: Shumski_petr@open.by

Information about the authors

Dyatko Aleksandr Arkad'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Informatics and Web-design. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Dyatko_A@tut.by

Khramenkov Andrey Sergeevich – post-graduate student, the Department of Radar-location and Send-receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Xras.tech@mail.ru

Yarmolik Sergey Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Professor, the Department of Radar-location and Send-receive Devices. Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Yarmsergei@yandex.ru

Shumskiy Petr Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Deputy Director for science. RSPC “Center of the Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (15/5, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Shumski_petr@open.by

Поступила 12.03.2016